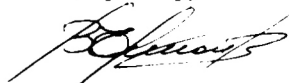


0- 777719

*На правах рукописи*



**ЕРМОЛАЕВ ВИТАЛИЙ ВИКТОРОВИЧ**

**ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ ДРЕВЕСИНЫ  
НА ДЛИТЕЛЬНУЮ ПРОЧНОСТЬ  
И ПОЛЗУЧЕСТЬ СОЕДИНЕНИЙ  
СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ  
НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ  
ЗУБЧАТЫХ ПЛАСТИНАХ**

05.23.01 – «Строительные конструкции, здания и сооружения»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Казань – 2009

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
**Цепаев Валерий Александрович**

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор  
**Брагов Анатолий Михайлович**

кандидат технических наук, доцент  
**Котлов Виталий Геннадьевич**

**Ведущая организация:** Муниципальное предприятие  
**Институт развития города**  
**«НижегородгражданНИИпроект»**

Защита состоится «30» 06 2009 г. в 14 00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.077.01 при Казанском государственном архитектурно-строительном университете по адресу: 420043, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Зеленая, 1

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет»

Автореферат разослан «28» мая 2009 г.

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000558206

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор

 Л.А. Абдрахманова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В настоящее время одновременно с клееными деревянными конструкциями получило распространение производство деревянных конструкций с соединениями на металлических зубчатых пластинах (МЗП).

Металлические зубчатые пластины являются индустриальным видом связи, отвечающие требованиям скоростного строительства при массовом производстве конструкций. Деревянные конструкции с соединениями на МЗП изготавливаются в заводских условиях на автоматизированном оборудовании из заранее заготовленных стандартных элементов. Наряду с простотой изготовления деревянные конструкции на металлических зубчатых пластинах обладают хорошими экономическими показателями. Во-первых, это низкий расход древесины на единицу площади покрытия здания по сравнению с другими деревянными конструкциями с традиционными видами узловых соединений. Во-вторых, малая масса конструкций положительно сказывается на скорости их монтажа. Небольшие легкие конструкции могут устанавливаться вручную или с применением кранов небольшой грузоподъемности. Компактная конструкция соединений позволяет перевозить готовые изделия в пакетах, благодаря чему рационально используется грузоподъемность транспорта. Наконец, дороговизна земли в центре крупных городов приводит к необходимости реконструкции существующих зданий с плоской или холодной чердачной кровлей. Надстройка мансардного этажа с легкими несущими деревянными конструкциями на металлических зубчатых пластинах позволяет успешно решить эту задачу как с технической точки зрения (незначительная нагрузка на фундамент, легкость монтажа), так и с архитектурной (возможность создания выразительной кровли любой формы).

Однако из практики эксплуатации деревянных конструкций на МЗП зданий различного назначения известны случаи их отказов. Одной из основных причин таких отказов является игнорирование при расчете соединений содержания в древесине связанной влаги. Отличительная особенность древесины состоит в гидрофильности ее целлюлозных составляющих и содержания определенного количества связанной влаги, соответствующей средним значениям относительной влажности воздуха и температуры помещения. Таким образом, древесина в конструкциях всегда частично пластифицирована влагой, оказывающей влияние на её механические свойства, прочность и деформативность соединений на податливых связях. Проведёнными В.А. Цепяевым исследованиями установленная ярко выраженная зависимость прочности и деформативности соединений на металлических зубчатых пластинах от величины и продолжительности действия нагрузки. Однако до последнего времени отсутствовали сведения о влиянии влажности древе-

сины на длительную прочность и ползучесть этого вида соединений. Соединения элементов деревянных конструкций на МЗП обладают свойством упругого последействия, которое проявляется в постепенном увеличении их деформаций под нагрузкой с течением времени. Поэтому расчет таких соединений по деформациям под расчётной нагрузкой, учитывающей влажностное состояние древесины, может оказаться определяющим для обеспечения долговечности конструкций зданий.

Учитывая перспективность соединений деревянных конструкций на металлических зубчатых пластинах можно считать, что задача исследований работы соединений в условиях длительного нагружения с учетом содержания связанной влаги в древесине является актуальной, решение которой позволит повысить эксплуатационную надежность конструкций.

**Целью диссертационной работы** являются экспериментально-теоретические исследования влияния влажности древесины на длительную прочность и ползучесть соединений на металлических зубчатых пластинах и разработка метода расчета соединений по деформациям от действия на конструкции эксплуатационных нагрузок.

Для достижения поставленной цели в процессе проведения научно-исследовательских работ решаются следующие **основные задачи**:

- исследование деформационно-прочностных характеристик древесины при смятии узким прямоугольным штампом в зависимости от направления волокон и влажности древесины;
- нормирование расчетных характеристик древесины в соединениях строительных конструкций на металлических зубчатых пластинах с учетом влажности древесины;
- экспериментально-теоретические исследования влияния влажности древесины на длительную прочность соединений на металлозубчатых пластинах;
- экспериментально-теоретические исследования влияния влажности древесины на ползучесть соединений на металлозубчатых пластинах;
- разработка метода расчета соединений на МЗП по деформациям с учетом длительности действия на конструкции снеговой и постоянной нагрузок;
- экспериментальные исследования деформаций ползучести соединений деревянных элементов под углом на МЗП;
- экспериментально-теоретические исследования развития сдвиговых деформаций и перемещений составных деревянных балок на МЗП при длительном нагружении;
- апробация методики прогнозирования развития деформаций соединений на металлических зубчатых пластинах во времени с учетом влажностного состояния древесины на основе результатов длительных испытаний узловых соединений и составных деревянных балок;



- внедрение результатов исследований в производственную практику.

#### **Научная новизна работы:**

- получены эмпирические зависимости для определения временных сопротивлений древесины и коэффициентов постели при смятии в зависимости от ширины сминающего штампа, направления волокон и влажности древесины;

- впервые определены значения расчетных характеристик древесины в соединениях на металлических зубчатых пластинах в зависимости от влажности (расчетные сопротивления и нормативные коэффициенты постели древесины при смятии под углом к направлению волокон);

- впервые установлены общие закономерности снижения прочности и роста деформаций соединений на МЗП при длительном нагружении в зависимости от влажности древесины;

- определены значения коэффициента условий работы к расчетной несущей способности соединений, учитывающего эксплуатационную влажность древесины конструкций;

- получено выражение для определения характеристики ползучести соединений на МЗП, используемой для оценки развития во времени деформаций соединений при длительном нагружении;

- разработана методика расчета соединений на МЗП по деформациям с учетом режима и длительности действия на конструкции эксплуатационных нагрузок;

- проведены длительные испытания составных деревянных балок на металлозубчатых пластинах под действием расчетной нагрузки, определенной с учетом фактической влажности древесины балок;

- получены аналитические выражения для определения развивающихся во времени сдвиговых деформаций и прогибов составных деревянных балок на МЗП с учетом влияния влажности древесины, достоверность которых подтверждена результатами длительных испытаний балок.

**Практическая значимость работы.** Результаты выполненных исследований позволят учесть влияние эксплуатационной влажности древесины на снижение прочности и развитие деформаций соединений строительных конструкций на металлических зубчатых пластинах в течение заданного срока их службы. Реализация результатов работы позволит обеспечить необходимую долговечность деревянных конструкций покрытия на МЗП зданий с различными температурно-влажностными условиями эксплуатации на стадии проектирования.

#### **Результаты диссертационной работы внедрены:**

- при проектировании мансардного этажа с использованием составных деревянных элементов на металлических зубчатых пластинах над домом № 60 по ул. Ильинской в г. Н.Новгороде;

- при проектировании двускатной кровли с использованием треугольных деревянных ферм на металлических зубчатых пластинах над зданием проходной на КС-22 в п. Абашево (Чебоксарское ЛПУМГ);

- при определении остаточного ресурса и оценке технического состояния зданий с составными деревянными элементами на металлических зубчатых пластинах при экспертизе промышленной безопасности ООО «ИКЦ «Промтехбезопасность».

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы доложены на VIII Всероссийской научно-практической конференции «Современные технологии в машиностроении» в г. Пензе (2004 г.); на X Нижегородской сессии молодых ученых в г. Дзержинске (2005 г.); на IV международной научно-технической конференции «Итоги строительной науки» в г. Владимире (2005 г.); на III международной научно-технической конференции «Современные проблемы совершенствования и развития металлических, деревянных, пластмассовых конструкций в строительстве и на транспорте» в г. Самаре (2005г.); на XI Нижегородской сессии молодых ученых в г. Кстово (2006 г.); на научно-технических конференциях аспирантов и магистрантов Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета (2005, 2006, 2007 г.г.)

**На защиту выносятся:**

- результаты исследований прочности и деформативности древесины разной влажности при смятии узким прямоугольным штампом;

- определение расчетных характеристик древесины в соединениях на металлических зубчатых пластинах с учетом влажности;

- результаты экспериментально-теоретических исследований длительной прочности соединений на МЗП в зависимости от влажности древесины;

- результаты экспериментально-теоретических исследований деформаций ползучести соединений на МЗП в зависимости от влажности древесины;

- метод расчета соединений на металлозубчатых пластинах по деформациям с учетом режима и длительности загрузки снеговой и постоянной нагрузками;

- результаты экспериментально-теоретических исследований узловых соединений и составных деревянных балок на металлических зубчатых пластинах при длительном нагружении.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 15 работ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов, библиографического списка и четырех приложений. Общий объем работы составляет 152 страницы, в том числе 53 рисунка в виде схем, графиков и фотографий, 27 таблиц, библиографического списка, включающего 109 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность проблемы, определена цель исследований, указаны научная новизна и практическая значимость работы.

В **первой главе** приводится общая характеристика и опыт применения деревянных строительных конструкций с соединениями на металлических зубчатых пластинах, выполнено обоснование выбранного направления и сформулированы задачи исследований.

Отмечается, что долговечность деревянных конструкций на металлических зубчатых пластинах в значительной степени определяется прочностью и деформативностью их соединений. Характерной особенностью соединений на МЗП является зависимость их прочности и деформативности от величины и продолжительности действия нагрузки.

Среди исследований, посвященных вопросам длительной прочности и деформативности древесины отмечаются работы Ф. Кольрауша, Р. Баумана, О. Графа, Ф.П. Белянкина, В.Н. Быковского, Н.А. Леонтьева, А.М. Иванова, В.Г. Михайлова, К.П. Кашкарова, В.Г. Леннова, В.П. Коцегубова, Е.Н. Квасникова и других. Фундаментальные исследования длительной прочности древесины проведены Ю.М. Ивановым.

Вопросам изучения работы нагельных соединений, к которым можно отнести соединения на МЗП, при действии длительных нагрузок посвящены работы В.М. Коченова, П.А. Дмитриева, Ю.Д. Стрижакова, Л.К. Стрижаковой и других. Универсальная теория расчета соединений деревянных элементов на цилиндрических нагелях с учетом влияния фактора времени была разработана П.А. Дмитриевым.

Исследования прочности и деформативности соединений на МЗП при действии кратковременных нагрузок проводились L. Beineke, S. Suddarth, E. Rysavy, H. Tomoyki, S. Hikaru, A.K. Наумовым, Д.В. Мартинцом, А.М. Дурновским, В.В. Даниловым, В.А. Цепаревым, Д.К. Арлениновым, В.Г. Котловым и другими. Комплексные экспериментальные исследования длительной прочности и деформативности соединений элементов из воздушно-сухой древесины на МЗП выполнены В.А. Цепаревым.

Первая методика расчета соединений на металлических зубчатых пластинах на прочность была предложена А.К. Наумовым, в основу которой были положены гипотезы расчета нагельных соединений В.М. Коченова. В.А. Цепарев, используя предпосылки теории расчета нагельных соединений П.А. Дмитриева, существенно усовершенствовал методику расчета этих соединений, отклонив условное ограничение расчетной предельной деформации. Метод расчета соединений на металлозубчатых пластинах во времени по деформациям, основанный на представлении о древесине как об упруго-вязком материале, был

разработан В.А. Цепевым и усовершенствован А.В. Крициным. Однако методы расчета предложенные В.А. Цепевым и А.В. Крициным, встречают большие трудности при анализе напряженного состояния соединений и не удобны для расчета с инженерной точки зрения.

Наибольшее применение несущие деревянные конструкции с соединениями на МЗП нашли в покрытиях отапливаемых и неотапливаемых зданий, характеризующихся средним значением относительной влажности воздуха  $\phi$  (%) и температуры. Согласно статистическим данным натурных наблюдений, систематизированных Ю.М. Ивановым, в «сухих» условиях эксплуатации отапливаемых зданий ( $\phi \approx 65 \dots 70\%$  при  $20^\circ\text{C}$ ) равновесная влажность древесины конструкций составляет  $\omega_p \approx 15\%$ , а для «влажных» условий эксплуатации  $\omega_p \approx 25\%$ .

При эксплуатации конструкций в неотапливаемых зданиях или под навесом среднее взвешенное значение влажности древесины  $\bar{\omega}_p = 17,3\%$ . Проведенными А.Д. Ломакиным исследованиями установлено, что в отапливаемых птицеводческих зданиях  $\omega_p = 15\%$ , а в не-

отапливаемых животноводческих зданиях зимой наружные слои древесины конструкций толщиной 20 мм увлажняются до 24 %. Следовательно, зубья пластин находятся в зоне древесины с повышенной эксплуатационной влажностью.

Поскольку соединениям на металлических зубчатых пластинах свойственна повышенная пластическая деформируемость даже при воздушно-сухой древесине, то увеличение в ней связанной влаги негативно отразится на работе этого вида соединений в условиях длительной эксплуатации.

Во **второй главе** приводятся результаты исследований влияния влажности на прочность и деформативность древесины сосны при смятии узким прямоугольным штампом.

При проведении исследований использовалась универсальная формула зависимости прочности древесины от влажности, предложенная Д.В. Мартинцом. На основании анализа результатов исследований В.А. Цепева и результатов авторских экспериментов получены выражения для определения временного сопротивления древесины при смятии штампом шириной  $B = 1,0 \dots 4,0$  мм вдоль  $R_{см.0}^{ep}(\omega)$  и поперек  $R_{см.90}^{ep}(\omega)$  направления волокон в зависимости от влажности  $\omega$  (%):

$$R_{см.0}^{ep}(\omega) = 0,38 \cdot \left[ 1 + 0,0034 \cdot (30 - \omega)^2 \right] \cdot R_c^{ep}(12); \quad (1)$$

$$R_{см.90}^{ep}(\omega) = (0,367 - 0,0414 \cdot B) \times \\ \times \left[ 1 + 0,0034 \cdot (30 - \omega)^2 \right] \cdot R_c^{ep}(12) \quad (2)$$

где  $R_C^{6p}(12)$  – временное сопротивление древесины при сжатии вдоль волокон для стандартной 12% -ной влажности.

Нормативное сопротивление древесины при смятии  $R_{CM}^H(\omega)$  с влажностью  $\omega$  определяется по формулам (1) и (2) с подстановкой нормативного сопротивления древесины при сжатии вдоль волокон, равного для древесины сосны и ели  $R_C^H(12) = 33$  МПа.

При расчете соединений элементов деревянных конструкций на прочность используются расчетные сопротивления древесины гнезда при смятии, определяемые по формуле

$$R_{CM}(\omega) = \frac{R_{CM}^H(\omega)}{\gamma_m} \cdot m_{CM}^{\partial л}, \quad (3)$$

где  $\gamma_m$  – коэффициент надежности по материалу, равный 1,17 при смятии древесины вдоль волокон и 1,25 – при смятии поперек волокон;  $m_{CM}^{\partial л}$  – коэффициент длительного сопротивления древесины гнезда, определяемый по формуле

$$m_{CM}^{\partial л} = \left( 0,77 - \frac{\lg \tau_3}{22} \right). \quad (4)$$

Коэффициент длительного сопротивления  $m_{CM}^{\partial л}$  определяется по эквивалентному времени  $\tau_3 = 0,167 \cdot \tau$  действия неизменной нагрузки, обоснованному в действующих рекомендациях по испытанию соединений деревянных конструкций. Для срока службы конструкций на МЗП  $\tau = 25$  лет  $\tau_3 = 4,175$  года ( $1,32 \cdot 10^8$  с;  $\lg \tau_3 = 8,12$ ) значение  $m_{CM}^{\partial л} = 0,4$ , как и для гвоздевых соединений (В.М. Коченов). В табл. 1 приведены значения расчетных сопротивлений древесины различной влажности при смятии вдоль ( $0^\circ$ ) и поперек направления волокон ( $90^\circ$ ).

Таблица 1

Расчетные сопротивления древесины сосны и ели  
разной влажности при смятии

Угол смятия, град.	В, мм	Значения расчетных сопротивлений древесины при смятии $R_{CM}(\omega)$ (МПа) в зависимости от влажности $\omega(\%)$				
		12	15	20	25	30
0	1-4	9,0	7,5	5,8	4,8	4,3
90	1,0	7,2	6,0	4,6	3,7	3,4
	2,0	6,3	5,3	4,0	3,3	3,0
	3,0	5,4	4,5	3,4	2,8	2,5
	4,0	4,5	3,7	2,9	2,3	2,1

При расчете соединений на МЗП по деформациям используется упругая характеристика древесины, называемая коэффициентом постели. На основании статистической обработки результатов испытания А.В. Крицина и А.В. Авдеева получены уравнения регрессии, отражающие зависимость коэффициента постели при смятии вдоль  $c_0^o(\omega)$  и поперек  $c_{90}^o(\omega)$  направления волокон древесины в зависимости от ширины сминающего штампа  $B = 1,0 \dots 4,0$  мм и влажности  $\omega$  (%):

$$c_0^o(\omega) = (2,289 - 0,14 \cdot B) \cdot (1,655 - 0,0492 \cdot \omega) \cdot R_c^{6p}(12); \quad (5)$$

$$c_{90}^o(\omega) = (0,826 - 0,094 \cdot B) \cdot (1,531 - 0,0398 \cdot \omega) \cdot R_c^{6p}(12). \quad (6)$$

Проведенные автором экспериментальные исследования показали хорошее совпадение опытных значений  $c_0^o(\omega)$  и  $c_{90}^o(\omega)$  с вычисленными по формулам (5) и (6) (отклонение составляет не более 7,18%).

В табл. 2 приведены значения нормативных коэффициентов постели древесины разной влажности, определенные по формулам (5) и (6) с использованием  $R_c^H(12) = 33$  МПа.

Для промежуточных углов смятия  $\alpha$  значения расчетных сопротивлений и нормативных коэффициентов постели вычисляются по стандартной формуле (СНиП II-25-80), в которой показатель степени  $n = 2$ .

Таблица 2

Нормативные коэффициенты постели древесины  
сосны и ели разной влажности

Угол смятия, град.	B, мм	Значения нормативных коэффициентов постели $c_0^H(\omega)$ и $c_{90}^H(\omega)$ (МПа/мм) в зависимости от влажности $\omega$ (%)				
		12	15	20	25	30
0	1,0	75,0	65,0	48,0	30,0	13,0
	2,0	70,0	61,0	44,0	28,0	12,0
	3,0	66,0	57,0	42,0	26,0	11,0
	4,0	60,0	52,0	38,0	24,0	10,0
90	1,0	25,0	22,0	18,0	13,0	8,0
	2,0	22,0	20,0	15,0	11,0	7,0
	3,0	19,0	17,0	13,0	10,0	6,0
	4,0	16,0	14,0	11,0	8,0	5,0

В третьей главе диссертации приводятся результаты экспериментально-теоретических исследований влияния влажности древесины на длительную прочность соединений на металлических зубчатых пластинах.

Снижение прочности соединений во времени при увеличении влажности древесины может быть оценено с помощью методики расчета В.А. Цепалева.

Несущая способность соединений  $T_b(\omega)$  и  $T_t(\omega)$  по изгибу зуба длиной  $l$  с учетом влажности древесины  $\omega$  при передаче усилия широкой  $b$  или узкой  $t$  плоскостью зуба определяется по формулам:

$$T_b(\omega) = k_{u.b}(\omega) \cdot b \cdot t \cdot \sqrt{R_u \cdot R_{см.b}(\omega)}; \quad (7)$$

$$T_t(\omega) = k_{u.t}(\omega) \cdot b \cdot t \cdot \sqrt{R_u \cdot R_{см.t}(\omega)}, \quad (8)$$

где

$$k_{u.b}(\omega) = k_b(\omega) \cdot \frac{l}{t} \cdot \sqrt{\frac{R_{см.b}(\omega)}{R_u}}; \quad (9)$$

$$k_{u.t}(\omega) = k_t(\omega) \cdot \frac{l}{b} \cdot \sqrt{\frac{R_{см.t}(\omega)}{R_u}}; \quad (10)$$

$$k_b(\omega) = \sqrt{2 + \frac{t^2 \cdot R_u}{l^2 \cdot R_{см.b}(\omega)}} - 1; \quad (11)$$

$$k_t(\omega) = \sqrt{2 + \frac{b^2 \cdot R_u}{l^2 \cdot R_{см.t}(\omega)}} - 1, \quad (12)$$

$R_u$  – сопротивление материала зуба изгибу.

Несущая способность соединений из условия равномерного смятия древесины гнезда определяется по формулам:

$$T_b(\omega) = b \cdot l \cdot R_{см.b}(\omega); \quad (13)$$

$$T_t(\omega) = t \cdot l \cdot R_{см.t}(\omega). \quad (14)$$

При определении кратковременной прочности соединений  $T_b^{ep}(\omega)$  и  $T_t^{ep}(\omega)$  в формулы (7)...(14) подставляются временные сопротивления древесины смятию  $R_{см}^{ep}$ , а длительной прочности  $T_b^{\partial л}(\omega)$  и  $T_t^{\partial л}(\omega)$  – длительные сопротивления  $R_{см}^{\partial л} = R_{см}^{ep} \cdot m_{см}^{\partial л}$ .

Влияние влажности на длительную прочность соединений на МЗП может быть учтено с помощью коэффициента условий работы  $m_{\theta}^C$ , т.е.

$$T_b^{\partial l}(\omega) = T_b^{\partial l}(12) \cdot m_{\theta}^C; \quad (15)$$

$$T_t^{\partial l}(\omega) = T_t^{\partial l}(12) \cdot m_{\theta}^C, \quad (16)$$

где  $T_b^{\partial l}(12)$  и  $T_t^{\partial l}(12)$  – длительная прочность соединений при стандартной 12%-ной влажности древесины.

Вычисленные средние значения коэффициента условий работы  $\overline{m_{\theta}^C}$  для эксплуатационной влажности древесины конструкций  $\omega = 12...25\%$  приведены в табл. 3.

Таблица 3

Значения коэффициента условий работы  $\overline{m_{\theta}^C}$

Обозначения	$\omega, \%$			
	12	15	20	25
$\overline{m_{\theta}^C}$	1,0	0,87	0,69	0,58

Для количественной оценки снижения прочности соединений на МЗП под нагрузкой с течением времени служит коэффициент длительного сопротивления  $m_c^{\partial l} = T^{\partial l}(\omega) / T^{\partial p}(\omega)$ . В том случае, когда кратковременная и длительная прочность соединений определяется из условия изгиба зуба

$$m_c^{\partial l} = \frac{k_u^{\partial l}(\omega)}{k_u^{\partial p}(\omega)} \cdot \sqrt{m_{cm}^{\partial l}}, \quad (17)$$

когда кратковременная прочность соединений определяется изгибом зуба, а длительная – равномерным смятием древесины гнезда

$$m_c^{\partial l} = \frac{l \cdot m_{cm}^{\partial l}}{k_u^{\partial p}(\omega) \cdot b} \cdot \sqrt{\frac{R_{cm}^{\partial p}(\omega)}{R_u}}. \quad (18)$$

Длительная прочность  $T(\tau)$  соединений на МЗП может быть представлена прямой в полулогарифмических координатах  $T - \lg \tau$  ( $\tau$  – время до разрушения, с) в виде (Ю.М. Иванов, В.А. Цепяев)

$$T(\tau) = 1,03 \cdot \left( 1 - \frac{\lg \tau}{\lg A} \right) \cdot T(t). \quad (19)$$

Прямая (19) отсекает на оси абсцисс (времени) отрезок  $\lg A = 17,1$ , а на оси ординат отрезок  $T_0 = 1,03 \cdot T(t)$ . В (19)  $T(t)$  – кратковременная прочность соединений с приведенным временем испытаний  $t = t_1/38,2$ , а  $t_1$  – время до разрушения при испытании с постоянной скоростью.



Для экспериментальной оценки влияния влажности  $\omega$  на длительную прочность соединений проводились испытания образцов соединений на пластинах с размерами зуба  $t \times b \times l = 1,2 \times 3 \times 15$  мм и равновесной влажностью древесины, равной 7, 12, и 30 %. Испытания проводились по методике Ю.М. Иванова, основанной на известном свойстве прямых долговечности, наклон которых можно найти, варьируя скорость нагружения в серии образцов. На рис. 1 представлены опытные точки результатов испытаний с координатами  $T(t, \omega)$ ;  $\lg t$ , в результате статистической обработки которых получены следующие уравнения регрессии:

$$\text{для } \omega = 7\% \quad T(\tau, \omega) = 536,2 - 31,93 \cdot \lg \tau; \quad (20)$$

$$\text{для } \omega = 12\% \quad T(\tau, \omega) = 486,3 - 27,07 \cdot \lg \tau; \quad (21)$$

$$\text{для } \omega = 30\% \quad T(\tau, \omega) = 343,4 - 20,15 \cdot \lg \tau. \quad (22)$$

Прямые (20)...(22) отсекают на оси времени отрезок  $\lg A$ , равный для влажности древесины 7, 12 и 30 % соответственно 16,79; 17,96 и 17,04 (среднее значение  $\lg A = 17,26$ ), т.е. незначительно отличаются от  $\lg A = 17,1$ , отсекаемого прямой (19). Приняв в (20)...(22)  $\lg t = 0$  получим значения отношения  $T(0, \omega)/T(t, \omega)$ , равные для влажности древесины 7, 12 и 30 % соответственно 1,031; 1,035 и 1,025, которые незначительно отличаются от соответствующего отношения из уравнения (19). Таким образом, лучи пучка прямых длительной прочности соединений на МЗП с разной влажностью древесины можно совместить в одну прямую при  $T(t, \omega) = 100\%$ , представленную на рис. 2. В этом случае уравнение длительной прочности (19) можно трансформировать, представив его в виде

$$T(\tau, \omega) = (1,03 - 0,0602 \cdot \lg \tau) \cdot T(t, \omega). \quad (23)$$

Установлено, что коэффициент длительного сопротивления соединений, определенный по экспериментальной прямой (23) для  $\omega = 12$  и 30%  $m_c^{\partial l} = 0,493$ , отличается от теоретического значения в диапазоне изменения влажности (12...30)%  $\overline{m_c^{\partial l}} = 0,519$  на 5%.

В четвертой главе диссертации приводятся результаты экспериментально-теоретических исследований влияния влажности древесины на деформативность соединений на металлических зубчатых пластинах.

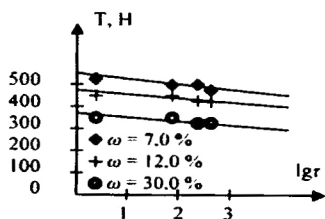


Рис. 1. Результаты испытаний соединений с разной влажностью древесины

Для экспериментальной оценки влияния влажности  $\omega$  на развитие деформаций ползучести проводились длительные испытания опытных образцов на пластинах с размерами зуба  $t \times b \times l = 1,2 \times 2,4 \times 12$  мм. В опытных образцах соединений усилие передавалось плоскостью зуба как вдоль ( $\alpha = 0^\circ$ ), так и поперек ( $\alpha = 90^\circ$ ) направления волокон древесины. Влажность древесины опытных образцов составила 6,25; 9,54; 18,0 и 21,9% для соединений под углом  $\alpha = 0^\circ$ , а для соединений под углом  $\alpha = 90^\circ$  – 9,5; 15,5; 25,4 и 30%.

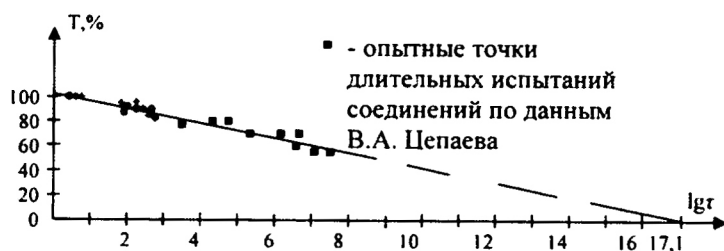


Рис. 2. Зависимость длительной прочности соединений на МЗП от времени

Длительные испытания образцов соединений проводились под расчетной нагрузкой  $T_b^P(\omega)$  (7), определенной с использованием расчетного сопротивления  $R_{cm}(\omega)$  (3), учитывающего фактическую влажность и прочность древесины образцов. Увеличение влажности древесины  $\omega$  с 6,25 до 21,9% ( $\alpha = 0^\circ$ ) снижает расчетную нагрузку в 1,63 раза, а с изменением  $\omega$  с 9,5 до 30% ( $\alpha = 90^\circ$ ) расчетная нагрузка снижается в 1,69 раза. Установлено, что под действием на соединения расчетной нагрузки независимо от влажности и направления волокон древесины ползучесть соединений происходит с затухающей скоростью и одинаковой интенсивностью. Для оценки развития во времени деформаций соединений на МЗП использовалась характеристика ползучести  $\varphi(\tau)$ . Для соединений на МЗП построена обобщенная кривая характеристики

ползучести  $\varphi^{0,90}(\tau)$ , для аппроксимации которой использовалась степенная зависимость вида

$$\varphi^{0,90}(\tau) = 0,39 \cdot \tau^{0,1968}, \quad (24)$$

где  $\tau$  – время в сутках.

Для повышения достоверности полученной зависимости (24) дополнительно проводились испытания соединений ( $\alpha = 0^\circ$ ) с влажностью древесины, равной 10,8; 11,2 и 11,8%, на пластинах с размерами зуба  $t \times b \times l$  соответственно 1,2×3×15 мм; 1,8×3,5×20 мм и 2×4×22 мм. Степенная зависимость (24) удачно описывает опытные данные в осях  $\varphi(\tau) - \tau$ .

При расчете соединений по деформациям древесина гнезда рассматривалась как сплошное, однородное, упругое основание, подчиняющееся гипотезе Винклера. Уравнение изогнутой оси зуба может быть представлено в виде неоднородного дифференциального уравнения четвертого порядка

$$\frac{d^4 y(x, \omega)}{d\xi^4} + 4y(x, \omega) = \frac{L^4}{EI} q(\xi), \quad (25)$$

где  $y(x, \omega)$  – прогибы оси зуба, соответствующие деформациям древесины с влажностью  $\omega$ ;  $\xi = x/L$  – безразмерная координата;  $L$  – характеристика балки на упругом основании

$$L = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot EI}{c(\omega)}}, \quad (26)$$

$EI$  – изгибная жесткость зуба;  $c(\omega) = c^0(\omega) \cdot b$  – погонный коэффициент постели древесины основания.

Зуб пластины загружен только в начальном сечении ( $x = 0, \xi = 0$ ) нагрузкой  $T_p(\omega)$  и изгибающим моментом  $M$ . Поэтому уравнение (25) сводится к однородному дифференциальному уравнению

$$\frac{d^4 y(x, \omega)}{d\xi^4} + 4y(x, \omega) = 0. \quad (27)$$

общее решение которого можно представить в виде

$$y(x, \omega) = e^{\xi} \cdot (c_1 \cdot \cos \xi + c_2 \cdot \sin \xi) + e^{-\xi} \cdot (c_3 \cdot \cos \xi + c_4 \cdot \sin \xi), \quad (28)$$

где  $c_1, c_2, c_3, c_4$  – произвольные постоянные, определяемые из граничных условий.

В результате решения уравнения (28) получены зависимости для определения основных параметров изогнутой оси зуба (прогиба, угла поворота сечений, изгибающего момента и поперечной силы), с ис-

пользованием гиперболо-тригонометрических функций  $A_x$ ,  $B_x$ ,  $C_x$ ,  $D_x$ , которые являются балочными функциями А.Н. Крылова. Для сокращения времени вычисления основных параметров выполнена автоматизация расчета.

Максимальный прогиб оси зуба в основании пластины определяется по формуле

$$y(0, \omega) = \frac{T_p(\omega)}{c(\omega) \cdot L} \cdot \frac{A_x^2 + 4 \cdot B_x \cdot D_x}{A_x \cdot B_x + 4 \cdot C_x \cdot D_x}, \quad (29)$$

где  $x = l$ , а  $\xi = \xi' = l/L$ .

Несущие деревянные конструкции покрытия зданий находятся под действием постоянной нагрузки с ежегодным приложением и удалением снеговой нагрузки. Полная деформация в соединяемом элементе от постоянной нагрузки  $N$  определяется из выражения

$$\delta_{\partial l}^{\circ}(N) = \delta_{\kappa}^{\circ}(N) \cdot (1 + 0,39 \cdot \tau^{0,1968}). \quad (30)$$

Согласно идеализированной модели изменения снеговой нагрузки в течении зимы в период снегонакопления  $t_m$  каждую декаду  $\Delta t$  происходит прирост нагрузки на одну и ту же величину  $S_i$ , действующую в течении времени  $t_i = (n + 1 - i)$ . Максимальную деформацию в соединяемом элементе от снеговой нагрузки  $S$  в момент времени  $t_m$  представим в виде суммы длительных деформаций  $\delta_{\partial l}(S_i)$

$$\delta_{\partial l}^{\circ}(S_i) = \delta_{\kappa}^{\circ}(S_i) \cdot (1 + 0,39 \cdot t_i^{0,1968}). \quad (31)$$

Суммарная деформация

$$\delta_{\partial l}^{\circ}(S) = \sum_{i=1}^n \delta_{\partial l}^{\circ}(S_i), \quad (32)$$

где  $n$  – число декад в периоде снегонакопления  $t_m$ .

В (30)...(32)  $\delta_{\kappa}^{\circ}(N)$  и  $\delta_{\kappa}^{\circ}(S_i)$  – кратковременные деформации, возникающие немедленно после приложения нагрузки, определяемые по формуле (29).

Полная деформация соединений на МЗП для срока службы конструкций  $\tau = 25$  лет от совместного действия снеговой и постоянной нагрузок может быть определена по формуле

$$\delta_{\partial l} = 2,41 \cdot \delta_{\kappa}(T), \quad (33)$$

где  $\delta_k(T)$  – кратковременная деформация соединения от расчетной нагрузки  $T_p(\omega)$ .

В пятой главе диссертации приводятся результаты исследований процессов деформирования узловых соединений и составных деревянных балок на металлических зубчатых пластинах при длительном нагружении.

С целью экспериментального подтверждения теоретических разработок в области прогнозирования деформаций ползучести соединений на МЗП проводились длительные испытания узловых соединений деревянных конструкций и составных деревянных балок на металлических зубчатых пластинах под расчетной нагрузкой. Для повышения достоверности результатов сравнения физико-механические характеристики древесины опытных соединений и балок определялись по результатам стандартных испытаний образцов, отобранных непосредственно из предназначенных для соединений элементов.

Образцы узловых соединений на МЗП представляли собой стык двух деревянных элементов под углом  $\alpha$ , равным  $30^\circ$  и  $90^\circ$  (Т-образный стык) (рис. 3 и рис. 4). Разработанная конструкция составной деревянной балки пролетом 3,0 м, соединялась тремя пластинами с каждой стороны шва на длине 1,2 м (рис 5). В опытных образцах узловых соединений и балок использовались пластины с размерами зуба  $b \times l = 1,2 \times 2,4 \times 12$  мм.

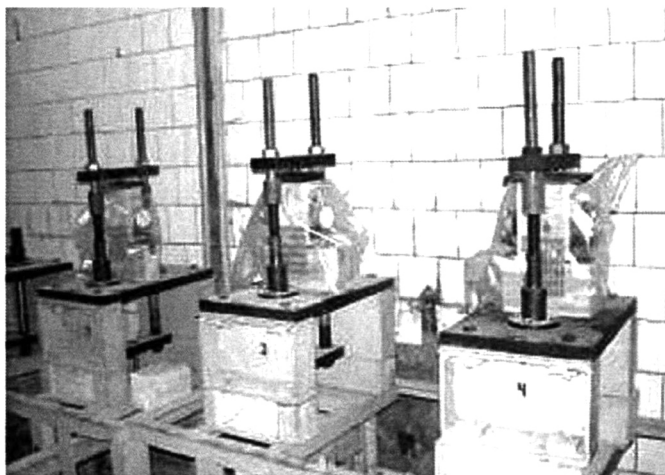


Рис. 3. Длительные испытания образцов соединений с расположением элементов под углом  $90^\circ$

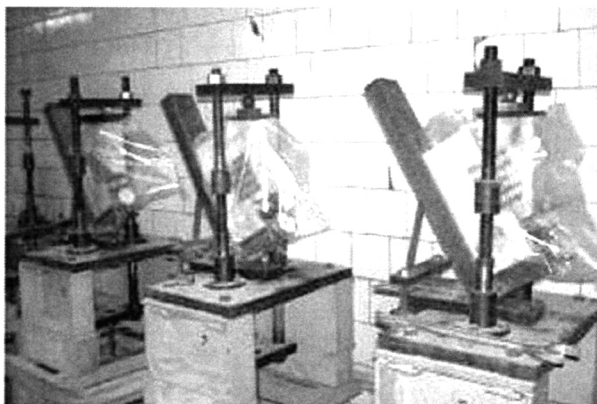


Рис. 4. Длительные испытания образцов соединений с расположением элементов под углом 30°

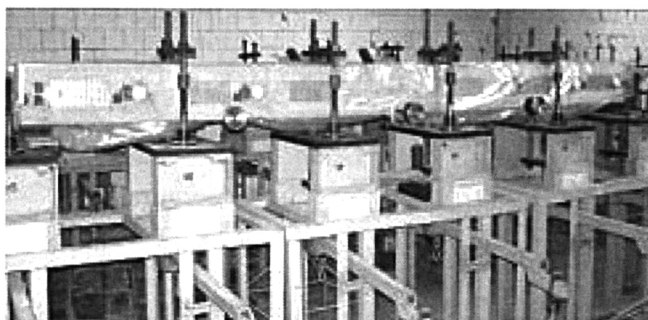


Рис. 5. Длительные испытания составной деревянной балки на МЗП

Апробация теоретических исследований заключалась в сопоставлении опытных и вычисленных значений деформаций ползучести узловых соединений, а также сдвиговых деформаций и прогибов составных деревянных балок.

Деформация ползучести соединений к моменту времени  $\tau$  вычислялась по формуле

$$\delta_n(\tau) = \delta_{\kappa,\alpha}(T) \cdot 0,39 \cdot \tau^{0,1968}, \quad (34)$$

где  $\delta_{\kappa,\alpha}(T)$  – кратковременная деформация, вычисленная от действия расчетной нагрузки на соединение.

Развивающиеся во времени  $\tau$  сдвиговые деформации составных деревянных балок определялись из выражения

$$\delta(\tau) = 2 \cdot \delta_c \cdot (1 + 0,39 \cdot \tau^{0,1968}), \quad (35)$$

где  $\delta_c$  – перемещение одной связи (зуба пластины), вычисленное по формуле (29) от действия усилия  $T_c$  в наиболее напряженных связях по концам балки.

Прогиб составной балки на момент времени наблюдения  $\tau$  определялся по формуле

$$f(\tau) = k_f(\tau) \cdot f_y(\tau), \quad (36)$$

где  $f_y(\tau)$  – прогиб балки цельного сечения под полной нагрузкой, определяемый с использованием длительного модуля упругости древесины

$$E_{dl}(\omega) = \frac{E(\omega)}{1 + b \cdot \tau^{0,21}}, \quad (37)$$

$E(\omega)$  – модуль упругости древесины с влажностью  $\omega$  (%);  $b$  – коэффициент, характеризующий изменение с влажностью скорости деформаций.

Коэффициент приведения прогиба  $k_f(\tau) = 1/k_{ж}(\tau)$  определялся с помощью коэффициента жесткости  $k_{ж}(\tau)$

$$k_{ж}(\tau) = \frac{1 + \alpha \cdot B(\tau)}{1 + B(\tau)}, \quad (38)$$

где  $\alpha = \Sigma I_1/I_y$ ;  $I_1$  – момент инерции отдельных слоёв балки;  $B(\tau)$  – коэффициент податливости шва

$$B(\tau) = \frac{\pi^2 \cdot S_1 \cdot n_{ш} \cdot E_{dl}(\omega) \cdot \delta_c(\tau)}{e \cdot l \cdot n_c \cdot T_c}, \quad (39)$$

где  $S_1$  – статический момент части сечения, лежащий выше (ниже) данного шва;  $n_{ш}$  – число швов;  $e$  – расстояние между осями крайних слоёв составной балки пролётом  $l$ ;  $n_c$  – число равномерно поставленных связей;  $T_c$  – сдвигающее усилие в наиболее напряженных связях.

Из приведенных в диссертации графиков видно, что аналитические кривые деформаций ползучести узловых соединений, сдвиговых деформаций и прогибов составных балок незначительно отличаются от экспериментальных.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Из практики эксплуатации строительных конструкций с соединениями на металлических зубчатых пластинах известны случаи их отказов, одной из основных причин которых является игнорирование при расчете соединений содержания в древесине связанной влаги.

2. В результате проведения исследований смятия древесины узким прямоугольным штампом установлены эмпирические зависимости временных сопротивлений и коэффициентов постели от направления волокон и влажности древесины.

3. Определены значения расчетных сопротивлений и нормативных коэффициентов постели при смятии под углом к направлению волокон и влажности древесины, необходимые для расчета соединений на МЗП по предельным состояниям первой и второй групп.

4. Установлено значительное влияние влажности древесины на величину длительной прочности соединений на МЗП. Влияние влажности может быть учтено с помощью коэффициента условий работы  $m_g^C$ , значения которого для эксплуатационной влажности древесины конструкций  $\omega = 12 \dots 25\%$  находятся в пределах  $0,58 \leq m_g^C \leq 1,0$ .

5. Экспериментально подтверждена возможность построения пучка прямых длительной прочности соединений с разной влажностью древесины путем их проведения через полюс  $\lg A = 17,1$  (отрезок, отсекаемый на оси времени в координатах  $T - \lg t$ ) и точки кратковременной прочности соединений  $T(t, \omega)$  с приведенным временем машинных испытаний  $t$ .

Лучи пучка прямых длительной прочности соединений с разной влажностью древесины можно совместить в одну прямую при  $T(t, \omega) = 100\%$ , которая может быть использована для прогнозирования длительной прочности соединений на МЗП.

6. Экспериментальные исследования деформаций ползучести соединений на МЗП с разной влажностью древесины  $\omega$  под расчетной нагрузкой  $T_p(\omega)$  позволили установить закономерности их изменения во времени и получить выражение для определения реологической характеристики соединений – характеристики ползучести.

7. В результате решения задачи изгиба зуба пластины, лежащего на сплошном линейно-деформируемом основании, получены выражения для определения основных параметров изогнутой оси зуба, для сокращения времени вычисления которых выполнена автоматизация расчета.

8. В результате расчета соединений по деформациям с учетом длительности действия на конструкции снеговой и постоянной нагрузок



получены выражения для определения величины полных деформаций соединений на МЗП к концу срока службы конструкций.

9. Проведены длительные испытания узловых соединений деревянных элементов под углами  $30^\circ$  и  $90^\circ$  и разработанных составных деревянных балок на МЗП под расчетной нагрузкой. Установлено, что аналитические кривые деформаций ползучести узловых соединений, сдвиговых деформаций и прогибов составных деревянных балок незначительно отличаются от экспериментальных. Этот факт свидетельствует о достоверности разработанной методики расчета соединений по деформациям.

10. Реализация результатов выполненных исследований позволит решить проблему обеспечения долговечности деревянных конструкций покрытия на МЗП для зданий с различными влажностными условиями эксплуатации на стадии проектирования.

## **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ**

1. Ермолаев, В. В. Теоретическое обоснование метода прогнозирования длительной прочности соединений на металлических зубчатых пластинах (МЗП) с учётом влияния влажности древесины / В. В. Ермолаев, В. А. Цапаев // Современные технологии в машиностроении : материалы Всерос. науч.-практ. конф. - Пенза, 2004. - С. 262-266.

2. Ермолаев, В. В. Теоретическая оценка влияния влажности древесины на длительную прочность соединений на металлических зубчатых пластинах / В. В. Ермолаев, В. А. Цапаев // Итоги строительной науки : материалы междунар. науч.-техн. конф. - Владимир, 2005. - С. 36-40.

3. Ермолаев, В. В. Влияние влажности древесины на величину коэффициента постели при смятии узким прямоугольным штампом / В. В. Ермолаев // Технические науки : X нижегородская сессия молодых ученых : тез. докл. - Дзержинск, 2005. - С. 29-30.

4. Ермолаев, В. В. Автоматизация расчета соединений деревянных конструкций на металлических зубчатых пластинах (МЗП) по деформациям / В. В. Ермолаев // Технические науки : сб. тр. аспирантов и магистрантов / Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т. - Н. Новгород, 2005. - С. 17-20.

5. Ермолаев, В. В. Экспериментальные исследования влияния влажности древесины на длительную прочность соединений на металлических зубчатых пластинах / В. В. Ермолаев, В. А. Цапаев // Современные проблемы совершенствования и развития металлических, деревянных, пластмассовых конструкций в строительстве и на транспорте : сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф. - Самара, 2005. - С. 338-342.

6. Ермолаев, В. В. Теоретическая оценка влияния влажности древесины на деформативность соединений строительных конструкций на металлических зубчатых пластинах / В. В. Ермолаев, В. А. Цапаев, В. П. Гушин // Вестник РААСН. Волжское региональное отд-ние. - Н. Новгород, 2005. - Вып. 8. - С. 163-173.

7. Ермолаев, В. В. Опыт реконструкции гражданских зданий с применением конструкций на (МЗП) / В. В. Ермолаев, А. В. Крицин // Промышленная безопасность – 2006. Исследование технического состояния строительных конструкций, зданий и сооружений в процессе экспертизы промышленной безопасности опасных производственных объектов : сб. ст. – Н. Новгород, 2005. – С. 95-98.

8\*. Ермолаев, В. В. Расчётные характеристики древесины в соединениях строительных конструкций на металлических зубчатых пластинах / В. В. Ермолаев, В. А. Цапаев // Жилищ. стр-во. – 2006. – № 2. – С. 14-15.

9. Ермолаев, В. В. Экспериментальные исследования влияния влажности древесины на ползучесть соединений на металлических зубчатых пластинах / В. В. Ермолаев, В. А. Цапаев // Вестник РААСН. Волжское региональное отделение. - Н. Новгород, 2006. - Вып. 9. - С. 201-211.

10\*. Ермолаев, В. В. О расчете деформаций соединений деревянных конструкций / В. В. Ермолаев, В. А. Цапаев // Жилищ. стр-во. – 2006. – № 6. – С. 21-23.

11. Ермолаев, В. В. О характеристике ползучести и величине предельной деформации соединений деревянных конструкций на металлических зубчатых пластинах / В. В. Ермолаев // Технические науки : X нижегородская сессия молодых ученых : тез. докл. - Татинец, 2006. - С. 67-68.

12. Ермолаев, В. В. Экспериментальные исследования ползучести соединений деревянных элементов под углом на металлических зубчатых пластинах / В. В. Ермолаев // Технические науки : сб. тр. аспирантов и магистрантов / Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т. - Н. Новгород, 2006. - С. 21-25.

13. Ермолаев, В. В. Теоретические и экспериментальные исследования развития сдвиговых деформаций и перемещений составных деревянных балок на металлических зубчатых пластинах при длительном нагружении / В. В. Ермолаев, В. А. Цапаев // Вестник РААСН. Волжское региональное отделение. - Н. Новгород, 2007. - Вып. 10. - С. 178-184.

14. Ермолаев, В. В. О предельной величине полной деформации соединений конструкций на металлических зубчатых пластинах в зависимости от влажности древесины / В. В. Ермолаев // Технические науки : сб. тр. аспирантов и магистрантов / Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т. - Н. Новгород, 2007. - С. 23-26.

15. Ермолаев, В. В. Влияние влажности древесины на длительную прочность и ползучесть соединений на металлических зубчатых пластинах / В. В. Ермолаев, В. А. Цапаев // Современные строительные конструкции из металла, дерева и пластмасс: материалы междунар. симп. - Одесса, 2007. - С. 238-243.

\* – статья опубликована в издании, включённом в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендуемых ВАК Российской Федерации.

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 1. Заказ 303. Тираж 100.

Типография Нижегородского госуниверситета  
им. Н.И. Лобачевского  
603000, Н. Новгород, ул. Б. Покровская, 37

